
INFLUÊNCIA DA RECONFIGURAÇÃO DE PISTAS NA OCORRÊNCIA DE ESPERAS EM VOO: UM ESTUDO DE CASO NO AEROPORTO INTERNACIONAL DE GUARULHOS

Ivan M. da Silva*, Alessandro S. de Freitas, Jean P. O. Lima, Pollyanne E. da Silva, Rafael De A. Almeida,
Adriano D. da Silva and André L. E. Melo
Airspace Control Institute - ICEA, Research Department

* **Corresponding author e-mail address:** matiasims@decea.mil.br

PAPER ID: SIT2284

ABSTRACT

A operação dos aeroportos está diretamente relacionada às condições meteorológicas, especialmente à direção e intensidade dos ventos. Fatores como mudança na direção e intensidade do vento, podem gerar riscos para as operações de pousos, que desencadeiam eventos de reconfiguração de pista (ou troca de cabeceira). Essa reconfiguração pode resultar em atrasos, acúmulo de voos em fase de aproximação e, por consequência, o aumento no consumo de combustível, ampliando as emissões de CO_2 , uma vez que manobras nessa fase são menos eficientes. Esse acúmulo de voos esperando autorização para pouso é denominado Efeito de Fila. Neste cenário, até que o voo receba autorização para pouso, diversas medidas ATFM podem ser aplicadas, como a Espera em voo. O trabalho propõe avaliar a influência da reconfiguração de pista na ocorrência de esperas em voo. Inicialmente, foi verificada a relação entre a ocorrência de espera e a reconfiguração de pista, por meio do teste Qui-quadrado com $p < 0,001$. Além disso, o teste de Wilcoxon indicou que o evento de reconfiguração de pista ocasiona uma diferença na mediana de esperas quando comparados os períodos de 3 horas antes e 3 horas depois da reconfiguração de pista, com $p < 0,001$. Os resultados indicaram que a reconfiguração de pista exerce influência na ocorrência de espera em voo no aeroporto internacional de Guarulhos.

Keywords: Controle de Tráfego Aéreo, Espera em voo, Reconfiguração de Pista, Troca de Cabeceira.

1. INTRODUÇÃO

Aprimorar a eficiência da aviação comercial tem um impacto significativo tanto na economia quanto no meio ambiente. Custos de combustível da aviação representam pelo menos 30% dos custos operacionais das companhias aéreas, que por sua vez acabam por ser repassados aos passageiros, de acordo com o Anuário do Transporte Aéreo, disponibilizado pela ANAC (2022). Segundo a ICAO (2016b) o Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (ATFM) é um serviço estabelecido com o objetivo de contribuir para um fluxo de tráfego aéreo seguro, ordenado e eficiente.

Com o objetivo de assegurar a eficiência e a segurança dos voos, é possível impor restrições de fluxo, denominadas medidas ATFM. Uma dessas medidas é a chamada espera em voo, que visa gerenciar o tráfego aéreo e evitar congestionamentos. A prática da espera envolve a determinação, por parte do controlador, de quais aeronaves devem executar manobras elípticas ou circulares em torno de um ponto de referência chamado "Fixo", conforme ilustrado na Figura 1. Esse fixo é um ponto geograficamente definido, em relação ao qual uma aeronave pode informar sua posição conforme Siewerdt (2010).

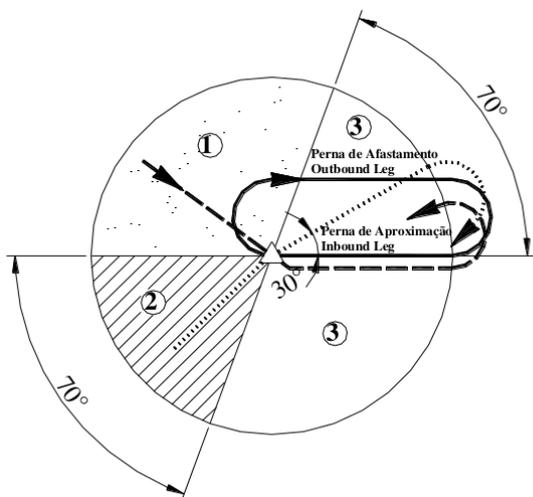


Figure 1 Procedimento de entrada em espera.

Fonte: ICA 100-37 DECEA (2020)

Segundo Reynolds (2014), de forma objetiva, a ineficiência do voo é definida como qualquer alteração que causa uma trajetória diferente daquela quadridimensional (latitude, longitude, perfil vertical e perfil de velocidade) ótima em termos de consumo de combustível. Afirmar ainda

que a ineficiência do voo tem diferentes impactos potenciais dependendo das fases do voo. Ao analisar as etapas de voo Reynolds (2014) apresenta alguns resultados relevantes sobre a ineficiência do voo, tais como: cerca de 20% a 25% de toda a ineficiência lateral do voo ocorre em situações de esperas e vetorização (resultados para aviação doméstica dos US e Europa), que representa em torno de 20% de queima adicional de combustível.

As esperas em voo são utilizadas como um atraso tático, seja por demanda do controle de tráfego aéreo, como saturação do espaço aéreo, meteorologia ou atrasos de aproximação. No Brasil, no segundo semestre do ano de 2021, foram identificadas 2.062 esperas, equivalente a 30.100 minutos (502 horas) de esperas e 1.090 toneladas de consumo adicional de combustível, aproximadamente. Esses números refletem a carência de melhorias no desempenho em relação à área de eficiência, a fim de alcançar os objetivos elencados no GANP (Global Air Navigation Plan) ICAO (2016a).

Christien et al. (2019) decompõe a ineficiência em duas partes: a parte individual, relacionada à algum evento do próprio voo; e outra parte de "fila" relacionada à ineficiência propagada posteriormente aos demais voos, refletindo em um efeito reacionário. A conclusão foi de que o tempo adicional de "fila" constitui a maior parte do tempo adicional do voo.

A maioria dos principais aeroportos está equipada com múltiplas pistas e, a qualquer momento, um subconjunto dessas pistas (e direções de tráfego associadas) é selecionado para chegadas e partidas das aeronaves. Um fator crítico na determinação da capacidade aeroportuária é a seleção de pistas, conhecida como configuração de pista segundo Ramanujam & Balakrishnan (2015).

Para uma reconfiguração de pista ocorrer são considerados muitos fatores, como: condições meteorológicas (vento e visibilidade), demanda prevista de chegada e partida, considerações ambientais, como procedimentos de redução de ruído e coordenação de fluxos com aeroportos vizinhos. As mudanças na configuração da pista exigem maior coordenação

entre os controladores de tráfego aéreo da torre ao aeroporto e as tripulações da aeronave e de terra e, portanto, mudanças frequentes de configuração não são desejáveis.

Neste contexto, este artigo apresenta um estudo para avaliar a influência da reconfiguração da pista do Aeroporto Internacional de Guarulhos (SBGR) na aplicação da medida restritiva da gestão do fluxo de tráfego espera em voo, tal correlação demonstra que alterações na operação do aeródromo podem propagar ineficiência no fluxo de tráfego aéreo, como o efeito reacionário. Como resultado deste trabalho esperamos fomentar trabalhos futuros de companhias aéreas e serviços ATFM para o desenvolvimento de soluções que auxiliem no planejamento e execução de suas atividades e, por meio de um processo decisório mais bem informado, diminuir o impacto econômico e, conseqüentemente, o consumo adicional de combustível e as emissões de CO_2 associado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o escopo deste estudo, foi selecionado o Aeroporto de Guarulhos (SBGR), localizado no estado de São Paulo. A seleção deste aeroporto ocorreu por ter o maior movimento de pousos e decolagens do Brasil, registrando 245.163 movimentos em 2022, de acordo com o Anuário Estatístico de Tráfego Aéreo 2022 do Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea, CGNA (2022). O Aeroporto de Guarulhos possui uma configuração de 2 pistas paralelas e próximas, com operação segregada, primordialmente, onde as pistas 10R/28L é utilizada para pouso, enquanto a pista 10L/28R para decolagem, a ilustração do layout do aeroporto pode ser encontrado na Figura 2.

O Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA), instituição de ciência e tecnologia, vinculada ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), que tem como missão a realização de pesquisas para o aprimoramento da gestão do espaço aéreo brasileiro, disponibilizou duas bases de dados. A primeira delas compreende informações sobre as ocorrências de espera em voo com destino ao Aeroporto de Guarulhos,

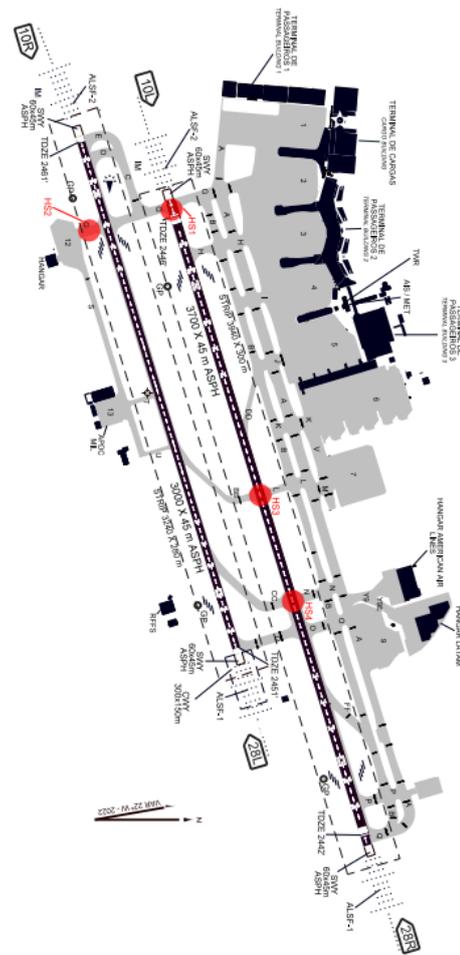


Figure 2 Layout do aeroporto de Guarulhos e suas pistas.

Fonte: AISWEB DECEA (2023)

enquanto a segunda consiste em uma base de dados que registra eventos de mudanças de cabeceiras no referido aeroporto.

A análise apresentada neste trabalho envolveu a integração das bases de dados da seguinte maneira: selecionamos um intervalo de tempo que abrangesse de março a dezembro de 2021, devido ser o período de interseção entre as duas bases fornecidas; com base na taxa-pico de chegadas no Aeroporto de Guarulhos, conforme documentado por DECEA (2022), estabelecemos um período de 3 horas antes e depois do evento de reconfiguração da pista do aeroporto como o intervalo de tempo em que o evento poderia potencialmente influenciar a ocorrência de esperas em voo.

A subseção 2.1. descreve em detalhes os dados recebidos bem como o processamento necessário para a análise em questão. Na subseção 2.2., demonstramos a aplicação dos tes-

tes estatísticos para avaliar as hipóteses relacionadas à propagação de ineficiências no fluxo de tráfego aéreo, considerando a ocorrência de reconfiguração de pista.

2.1. Dados Experimentais

A Tabela 1 apresenta um exemplo da base de dados que contém as informações sobre as ocorrências de esperas em voo. As informações desta tabela é resultado de uma aplicação desenvolvida pelo ICEA que utiliza a técnica de sobreposição de trajetórias de voo, resultando em uma compilação abrangente e precisa sobre a área e o tempo que ocorreram as esperas.

Table 1 Dados de Espera em Voo.

Indicativo	Pouso	Cabeceira	Espera	Duração
TAM3115	2021-04-16 19:27:27	10R	1	00:08:05
AZU4940	2021-04-03 16:48:53	10R	1	00:21:03
GLO4007	2021-04-03 12:16:46	28L	0	00:00:00

O campo *Indicativo* descreve a identificação do voo, no campo *Pouso* são registradas a data e hora de chegada no aeroporto, a *Cabeceira* fornece a informação sobre a pista onde foi realizado o pouso, o campo *Espera* indica se a aeronave realizou a espera em voo e no campo *Duração* é registrado o tempo de espera em voo.

A Tabela 2 apresenta um exemplo da base de dados que contém as informações sobre as reconfiguração de pistas. Essas informações são derivadas do sistema de gerenciamento da torre do aeroporto.

Table 2 Dados de Reconfiguração de Pistas.

Aeródromo	Atual	Anterior	Troca
SBGR	10R	28L	2021-04-03 12:16:46
SBGR	28L	10R	2021-04-03 18:23:32
SBGR	10R	28L	2021-04-03 22:11:41

No campo *Aeródromo* é registrado o indicativo do aeroporto no padrão da Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO), os campos *Atual* e *Anterior* contém o registro das informações do momento da mudança de pista indicando a pista atual e anterior, respectivamente, o campo *Troca* registra a data e hora da reconfiguração de pista.

As bases de dados foram combinadas por meio de junção utilizando como critério de relacionamento a correspondência entre o registro

da hora de pouso com a hora da mudança de configuração de pista.

2.2. Análise Estatística

A aplicação de testes estatísticos é relevante no contexto do gerenciamento de tráfego aéreo, porque permite estabelecer relações objetivas e baseadas em evidências entre diferentes eventos e variáveis. Essas análises permitem observar padrões entre eventos (como mudanças climáticas, atrasos de voo, reconfigurações de pistas e outros fatores) estão interconectados e como podem impactar a eficiência e qualidade do serviço Menéndez et al. (2022).

De acordo com Christien et al. (2019), o efeito de fila é responsável pela maior parte da ineficiência no gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo. Desta forma, ao comprovarmos que a troca de cabeceira pode dar início ao efeito de fila, poderíamos dar suporte a tomadas de decisão para mitigar impactos à operação.

O teste qui-quadrado é utilizado para verificar se há associação estatística entre duas ou mais variáveis categóricas Morettin & Bussab (2017). Além disso o teste é não paramétrico, que não requer suposições sobre a distribuição dos dados Almeida & Emmendoerfer (2022). O teste foi utilizado com o objetivo de verificar se há dependência da reconfiguração pista com a ocorrência de esperas.

Para verificar a diferença das esperas antes e depois da reconfiguração de pista foi utilizado o teste de Wilcoxon para amostras pareadas. O teste de Wilcoxon é não paramétrico e tem como objetivo verificar diferença entre as medianas de amostras pareadas. É importante destacar que o teste de Wilcoxon foi escolhido devido à violação dos critérios de pressupostos necessários para a aplicação dos testes paramétricos Triola (2008).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estudo foi realizado no Aeroporto de Guarulhos, no período de março a dezembro de 2021, registrando um total de 79.982 voos. É importante destacar que o evento de espera em voo trata-se de um evento considerado de baixa

ocorrência, uma vez que apenas 5,47% ($n = 4.382$) dos voos realizaram esperas, sendo que 18,58% ($n = 814$) dessas esperas ocorreram durante os períodos de até 3h após a reconfiguração de pistas. Vale ressaltar, 13,65% ($n = 10.302$) dos voos que ocorreram durante o período de reconfiguração também não realizaram esperas, conforme ilustrado na Figura 3.

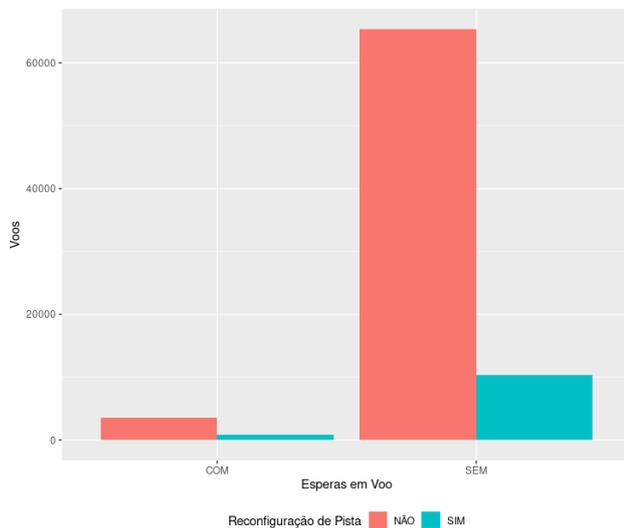


Figure 3 Ocorrência de esperas em voo na reconfiguração de pista no aeroporto de Guarulhos.

Ainda na Figura 3, é possível observar que a proporção de ocorrência de esperas em voo é maior durante os períodos de reconfiguração de pista, em comparação com os períodos em que não há reconfiguração. Complementando os resultados anteriores, pode-se observar que a proporção de voos que realizaram esperas é 3 vezes maior no período de 3h, conforme ilustrado na figura 4.

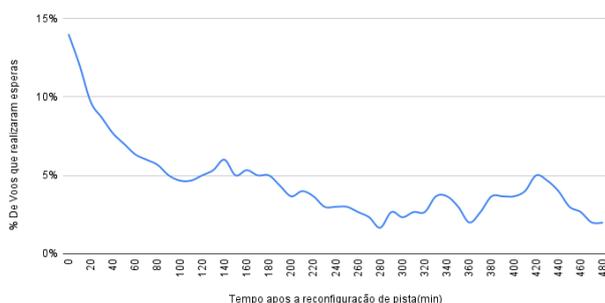


Figure 4 Ocorrência de espera em voo por tempo apos a reconfiguração de pista.

O teste Qui-quadrado, realizado para analisar a relação entre a reconfiguração de pista e a ocorrência de esperas em voo, indicou que existe uma associação significativa entre essas

variáveis, com $p < 0,001$. O estudo também buscou verificar se a reconfiguração de pista tem um efeito no padrão de ocorrência de esperas, quando comparados os períodos de 3h antes e após a reconfiguração. Para isso, foi utilizado o teste de Wilcoxon, que é adequado para comparar a diferença entre dois períodos relacionados. O teste constatou que há uma diferença significativa na mediana de ocorrências de esperas, antes e depois da reconfiguração de pista, com um $p < 0,001$.

Os resultados dos testes estatísticos sugerem que a reconfiguração de pistas no Aeroporto de Guarulhos tem impacto significativo na ocorrência de esperas. As reconfigurações de pistas podem ser ocasionadas por condições meteorológicas e outros fatores, resultando assim em atrasos e efeito de fila. O presente estudo fornece informações úteis para gestores buscarem melhorias na gestão espaço aéreo, visando minimizar as esperas em área terminal, reduzindo assim o consumo de combustível e emissão de CO_2 pelas aeronaves.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo indicou que há influência da reconfiguração de pista com ocorrência de espera em voos com destino ao aeroporto de Guarulhos. Dos voos analisados com ocorrência de esperas, 18,58% foram potencialmente ocasionadas pela reconfiguração de pista. Em seguida, verificou-se que o evento de reconfiguração de pista apresenta uma diferença significativa quando comparados os períodos antes e depois da troca de cabeceira. As constatações acima foram avaliadas por meio de testes estatísticos apropriados para cada uma das análises em questão. Para trabalhos futuros, uma vez comprovada a associação, recomenda-se o desenvolvimento de preditores de reconfiguração de pista para embasar o processo decisório por parte dos gestores de fluxo. Para isso, sugerimos o emprego de dados meteorológicos e de gerenciamento de tráfego aéreo na construção desses modelos.

Referências

- Almeida, T. C. d. & Emmendoerfer, M. L. (2022). Coprodução de serviços públicos e participação social: o efeito do decreto nº 9.759/2019 na vigência dos conselhos gestores brasileiros, *Revista Acadêmica Da Faculdade De Direito Do Recife* 94, 211.
- ANAC (2022). Anuário do transporte aéreo. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-do-transporte-aereo/panorama-do-mercado/anuario-transporte-aereo>.
- CGNA (2022). Anuário estatístico de tráfego aéreo. Disponível em: http://portal.cgna.decea.mil.br/files/uploads/anuario_estatistico/anuario_estatistico_2022.pdf.
- Christien, R., Hoffmann, E. & Zeghal, K. (2019). Spacing and pressure to characterise arrival sequencing, Thirteenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar.
- DECEA (2020). Serviços de tráfego aéreo.
- DECEA (2022). Portal operacional cgna. Disponível em: <http://portal.cgna.decea.mil.br>.
- DECEA (2023). Aisweb - informações aeronáuticas. Disponível em: <https://ASIWEB/?i=cartas>.
- ICAO (2016a). Global air navigation plan 2016-2030 Disponível em: <https://www4.icao.int/demo/GANP/GANP'EN.pdf>.
- ICAO (2016b). Procedures of Air Navigation Service Air Traffic Management.
- Menéndez, O. H., Silva, N. A. B. & Pitanga, H. N. (2022). Análise estatística aplicada à gestão do tráfego em interseção semaforica, *Research, Society and Development* 11, e0511326178.
- Morettin, P. A. & Bussab, W. O. (2017). Estatística básica, Saraiva Educação SA,.
- Ramanujam, V. & Balakrishnan, H. (2015). Data-driven modeling of the airport configuration selection process, *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 45(4), 490–499.
- Reynolds, T. G. (2014). Air traffic management performance assessment using flight efficiency metrics Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.02.01>.
- Siewerdt, E. (2010). *Trocando em Miúdos - Dicionário de Termos Aeronáuticos*, CR Editorial, São Paulo.
- Triola, M. F. (2008). Introdução à estatística *Anais do Introdução à estatística*, pp. xxvi–310.